

# 激光—电弧复合焊接接头根部特性分析

徐 良<sup>1,2</sup>, 雷 振<sup>1</sup>, 杨海锋<sup>2</sup>, 郑 红<sup>1</sup>, 崔 辉<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨 150028; 2. 哈尔滨现代焊接技术有限公司, 哈尔滨 150080)

**摘 要:** 对厚板 HQ785T1 低合金高强度钢填充 HS-70 焊丝激光—电弧复合焊接接头根部化学成分分析及元素线扫描分析, 结果表明, 焊缝部位主要元素的含量介于母材和焊丝之间, 焊缝从上部到根部, 随着深度的增加, 焊缝元素组成越接近母材, 根部焊缝组成以母材成分为主, 焊丝成分所占比例较小; 焊缝根部冲击韧性低于焊缝上部, 增大坡口钝边, 焊缝根部的冲击韧性降低; 金相显示根部焊缝中心组织为粒状贝氏体组织, 随着钝边尺寸的增加, 碳化物析出量减少, 组织略显粗大, 组织脆性增加。

**关键词:** 低合金高强度钢; 复合焊; 接头根部; 元素分布

**中图分类号:** TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400075

## 0 序 言

低合金高强度钢具有比强度高、韧性好等特点, 且综合性能优于碳素结构钢, 使其在许多重要工程结构中得以大量应用<sup>[1]</sup>。低合金高强度钢焊接难点在于热影响区易出现软化及脆化现象, 甚至焊缝出现冷裂纹。工程生产中, 为了防止软化、脆化以及焊接冷裂纹现象, 焊接方法选择时, 激光焊接或激光—电弧复合焊接成为一种较为理想焊接方式<sup>[2-3]</sup>。激光焊接具有高精度、高速度、大穿透比及小焊接变形等优点在结构件的焊接中应用越来越广泛<sup>[4-6]</sup>。低合金高强度钢激光—电弧复合焊的研究表明, 该技术可以实现低合金高强度钢的无预热或低温预热条件下优质高效的焊接<sup>[7-8]</sup>。然而, 中等厚度板材激光—电弧复合焊接对接坡口一般采用大钝边、小角度、无间隙形式, 与传统坡口形式存在较大差别, 所形成的接头断面形状也与常规弧焊存在较大差异, 钝边部位形成的接头根部位置的化学成分、组织状态及力学性能等对焊接接头质量影响较大, 但在此方面的研究较少, 缺乏较系统研究数据。

文中对激光-MAG 电弧复合焊接接头根部特性进行较系统研究, 基于 28 mm 厚度低合金高强度钢激光-电弧复合焊接接头, 分析了激光-MAG 复合焊接的接头根部的化学元素分布特征、金相组

织以及接头根部的冲击韧性等典型特征, 综合分析其成因及表征特点, 对激光—电弧复合焊接的接头坡口设计、性能指标确定及应用推广提供基础数据支撑。

## 1 试验方法

试验所用材料为 28 mm 厚的 HQ785T1 高强度钢, 焊丝采用 HS-70, 直径  $\phi 1.2$  mm。采用 Y 形坡口对接焊, 坡口的钝边为 7 mm, 坡口的角度 30°, 无间隙对接, 采用单面焊双面成型的方式。激光与电弧复合的方式为激光在前, 电弧在后, 光丝间距  $D_{la} = 3$  mm。试验所用激光器为 IPG 公司的 YLS-10000 光纤激光器, 光纤芯径为 400  $\mu$ m, 焊接电源为 Fronius TPS4000 CMT 焊机, 试验原理如图 1 所示。

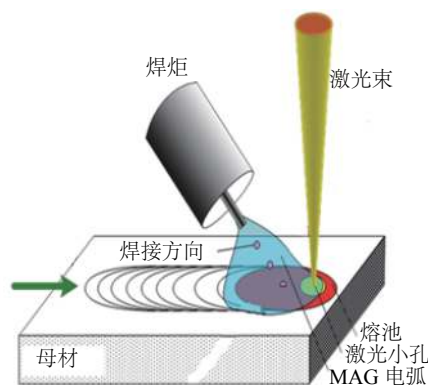


图 1 试验原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser beam welding

2 试验结果及分析

2.1 焊缝根部化学成分

对于低合金高强钢厚板大钝边的激光焊焊缝的特性与焊缝元素分布有密切关系,根部作为易出现裂纹等缺陷的位置,需对大厚板激光—MAG 电弧复合焊焊缝接头取样并进行元素分析,取样位置如图 2 所示,试验结果如表 1 所示。

对母材部分、根部焊缝中心以及焊丝的主要化学成分进行统计分析如图 3 所示。

从表 1 可得,复合焊接头焊缝根部的元素含量介于母材与焊丝之间。母材和焊丝中 Si, Cr, Ni, Ti 四种元素含量相差较大,由公式可推算出母材与焊丝在复合焊接头中各自所占比例,以 Cr 为例,设根部焊缝中 Cr 来源母材占比为  $x$ ,焊丝为  $1-x$ ,经

$0.57x + 0.038(1-x) = 0.35$ ,可得  $x = 0.59$ ,依此类推四种元素含量如表 2 所示。

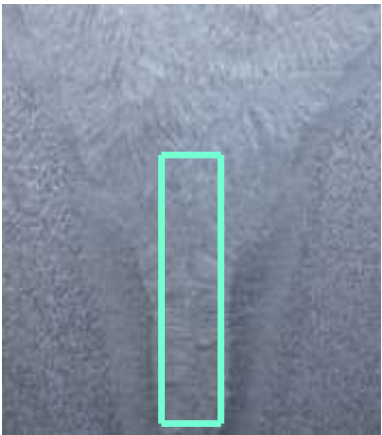


图 2 复合焊焊缝根部元素检验取样位置  
Fig. 2 Sketch map of sampling point location

表 1 复合热源焊接接头母材、焊丝及根部焊缝中心化学成分 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical compositions of parent material, welding wire and root weld center of welded joint

材料	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	Ti	Nb	S	P
母材	0.10	0.57	0.004 9	0.34	0.19	1.50	0.014	0.042	0.002 9	0.015
焊丝	0.093	0.038	0.84	0.36	0.47	1.65	0.076	0.012	0.005 5	0.009 3
焊缝上部	0.093	0.044	0.72	0.36	0.33	1.22	0.027	0.022	0.008 1	0.009 1
焊缝根部	0.10	0.35	0.36	0.36	0.29	1.48	0.032	0.024	0.005 5	0.011

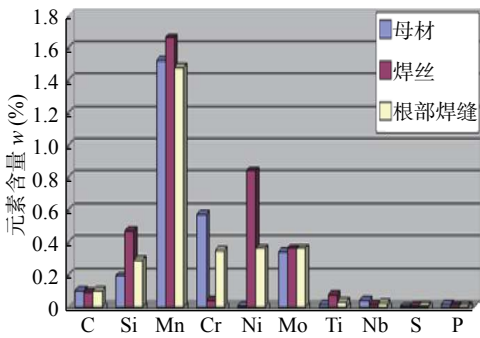


图 3 母材、焊丝及根部焊缝化学成分含量对比  
Fig. 3 Comparison of chemical composition contents of base metal, welding wire, root weld

表 2 焊缝根部合金元素来源中母材所占比例  
Table 2 Proportion of base metal in the source of alloy elements at the root of welded joint

Cr	Ni	Si	Ti	平均值
59%	64%	64%	71%	65%

从表 2 可得,焊缝根部元素来源于母材和焊材,其中母材比例占 65%,焊丝比例占 35%,这说明焊缝根部元素组成与母材元素组成更为接近。这主要因为对于大厚板的激光—MAG 电弧复合焊,材

料填充主要依靠电弧的焊丝,试板的穿透主要依靠激光的能量,由于激光的加入,焊缝的熔深较大,电弧的焊丝的材料主要集中在焊缝上部,到达较深的根部位置较少,所以焊丝对焊缝根部元素组成的影响较小,根部组织的化学成分接近母材。

对焊缝根部位置熔合线处做元素线扫描分析,研究熔合线位置 Si, Mo, Ti, Cr, Mn, Ni 元素的分布情况,线扫描结果如图 4 所示。

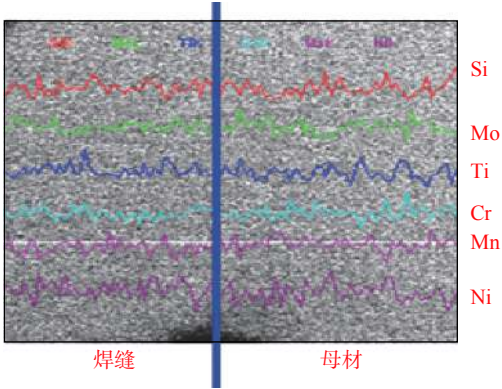


图 4 元素线扫描结果  
Fig. 4 The element scan result of weld bond

从图 4 可以得出,复合焊焊缝根部位置熔合线

处元素含量与母材基本相同,这从侧面佐证了激光深熔焊焊缝根部的元素组成主要由母材的元素贡献,受焊丝元素成分的影响较小。

## 2.2 冲击韧性特征

元素组成的差别往往体现在冲击韧性的差别,对激光—MAG 电弧复合焊在不同钝边值及开口角度条件下各焊缝接头不同部位进行 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击试验,试验结果见表 3。

表 3 不同坡口尺寸各部位冲击吸收能量 ( $A_K/\text{J}$ )

Table 3 Impact value of single side welded joints with different groove sizes

冲击位置	上部中心	上部熔合线	根部中心	根部熔合线
$H=5\text{ mm}, \alpha=60^{\circ}$	110	155	46	136
$H=5\text{ mm}, \alpha=45^{\circ}$	103	122	59	88
$H=5\text{ mm}, \alpha=30^{\circ}$	—	—	52	—
$H=7\text{ mm}, \alpha=30^{\circ}$	—	—	50	—

从表 3 可得,焊缝上部中心的冲击韧性高于焊缝根部中心,上部熔合线处的冲击韧性高于根部熔合线.焊缝根部中心位置的冲击值最低,并且随钝边尺寸增大而减小。

钢的淬硬性与其淬硬组织的类型和分布有很大关系,淬硬组织的形成主要与材料的淬硬倾向、焊接热输入有关,钢材本身的淬硬倾向主要与其化学成分决定.低碳微量多合金元素的低合金高强钢的淬硬倾向一般用  $P_{\text{cm}}$  值表征,数值越大,淬硬倾向越高, $P_{\text{cm}}$  值可由式 (1) 得出,依据表 1 可计算出接头的母材、上部焊缝中心及根部焊缝中心的  $P_{\text{cm}}$  值,结果如图 5 所示。

$$P_{\text{cm}} = C + \frac{\text{Si}}{30} + \frac{\text{Mn} + \text{Cu} + \text{Cr}}{20} + \frac{\text{Ni}}{60} + \frac{\text{Mo}}{15} + \frac{\text{V}}{10} + 5B \quad (1)$$

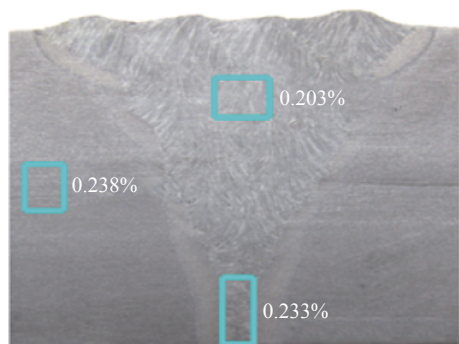


图 5 复合热源焊接接头不同部位  $P_{\text{cm}}$  值

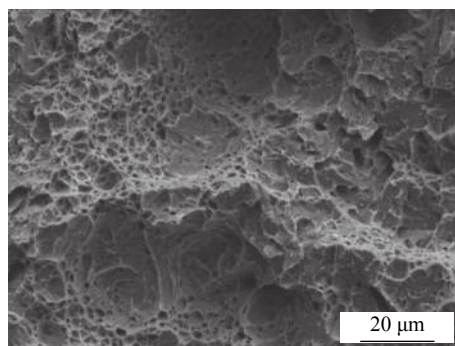
Fig. 5  $P_{\text{cm}}$  value of different parts of welded joint

从图 5 焊缝各位置的  $P_{\text{cm}}$  值可得,母材的  $P_{\text{cm}}$  值最大,焊缝接头根部  $P_{\text{cm}}$  值与母材  $P_{\text{cm}}$  值接近,焊缝上部中心位置的  $P_{\text{cm}}$  值最小,由此可见,与焊

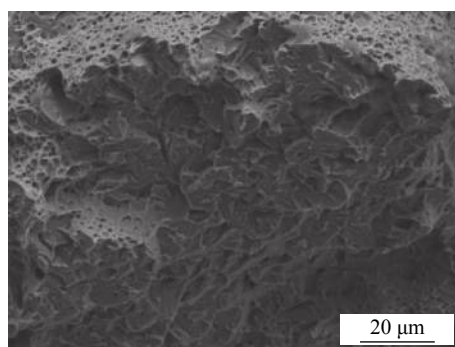
缝上部中心位置相比,焊缝根部的淬硬倾向较大。

以上分析可知,焊缝根部中心元素组成与母材类似,排除焊接热循环等焊接接头微观组织形成因素的影响,主要从化学成分含量角度考虑,接头根部淬硬倾向与母材接近,高于上部焊缝,这与上部焊缝融合焊丝成分较多有关.接头根部淬硬倾向的增加对根部的力学性能形成一定影响。

冲击试验表明,焊缝根部的低温冲击韧性值最低.不同钝边尺寸下,焊缝根部冲击断口的 SEM 形貌见图 6。



(a) 钝边尺寸 5 mm (59 J)



(b) 钝边尺寸 7 mm (50 J)

图 6 不同钝边尺寸根部焊缝冲击断口形貌 SEM

Fig. 6 SEM image of impact fracture on root weld with different groove sizes

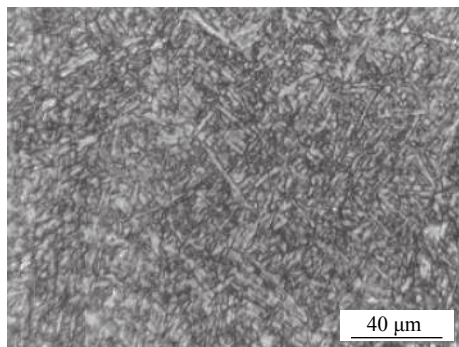
从冲击断口形貌可得,不同钝边尺寸下,焊缝根部位置断口都由韧窝与准解理面组成的混合形貌,其断裂方式均介于塑性断裂方式与准解理断裂方式之间,并且,随接头坡口钝边尺寸的增大,准解理面区域所占比增加,冲击韧性值减小.结合后续对该部位金相组织特征的分析,可得出此现象的主要原因可能为随接头坡口钝边尺寸的增大,焊缝根部碳化物的析出减少,焊缝根部的组织略变粗大,其组织淬硬倾向变大,从而使其冲击韧性有所下降。

## 2.3 金相组织特征

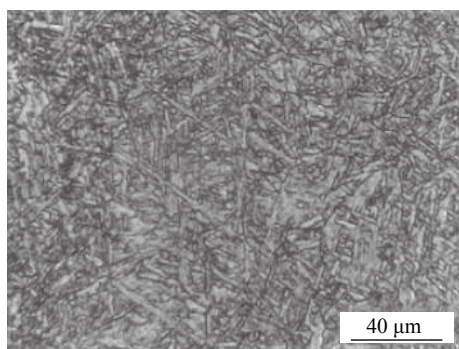
焊缝接头根部元素含量的不同,导致了焊缝根部与焊缝其它部位力学性能的差异,其根本原因在



于激光—MAG 电弧焊接大厚板时,填充材料不能充分到达根部位置,焊缝上部和根部元素含量差别较大,且板厚或钝边越大,这种差异越大。对不同钝边尺寸的焊缝根部进行取样,分析其金相组织的特征,复合焊钝边分别为 5 和 7 mm 焊缝根部的金相组织形貌见图 7。



(a) 钝边尺寸 5 mm



(b) 钝边尺寸 7 mm

图 7 不同坡口尺寸单面焊根部焊缝中心金相组织

Fig. 7 Microstructure of the center of single side welded joint root with different groove sizes

从图 7 复合焊接接头根部金相组织的形貌可得,不同钝边尺寸下,焊缝根部组织均为粒状贝氏体,并且随着接头钝边尺寸的增大,碳化物的析出量有所减少,使得组织出现粗化现象,粗化的贝氏体组织脆性增加。焊缝根部组织粗大、脆化主要因为钝边尺寸增大,焊缝根部与上部 MAG 电弧熔池距离较远,根部接收到的热量较小,并且冷却速度较快,焊缝根部在高温停留时间较短,而碳化物的析出需要一定的时间及过程,时间短,碳化物析出量较少,并且由于温度梯度大,一次结晶组织长大速度快,组织变粗大而脆化。

### 3 结 论

(1) 采用激光—电弧复合焊接方法对大钝边无间隙坡口形式焊缝进行焊接时,焊缝根部元素组成

与母材接近,熔池流动并未将上部熔池内的焊丝成分充分带至焊缝根部。

(2) 针对 HQ785T1 低合金高强钢,激光—电弧复合焊接接头元素分布不均造成焊缝根部的淬硬倾向较焊缝上部高,加之根部温度梯度较大,根部的冲击韧性低于焊缝上部,增大坡口钝边,焊缝根部的冲击韧性降低。

(3) 复合焊接接头金相组织显示根部焊缝中心组织为粒状贝氏体组织,随着钝边尺寸的增加,碳化物析出量减少,组织略显粗大,组织脆性增加。

### 参考文献:

- [1] 邹增大. 低合金调制高强度钢焊接及工程应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [2] 李俐群, 陈彦宾, 陶 汪. 铝合金双光束焊接特性研究 [J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1783 – 1788.  
Li Liqun, Chen Yanbin, Tao Wang. Study on the characteristics of double beam welding of aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(11): 1783 – 1788.
- [3] Zeng Huilin, Xu Yuanbin, Wang Changjiang, *et al.* Research on laser-arc hybrid welding technology for long-distance pipeline construction [J]. China Welding, 2018, 27(3): 53 – 58.
- [4] 杨海峰, 王旭友, 王 威, 等. 铝合金双光束焊接过程稳定性分析 [J]. 焊接学报, 2016, 37(6): 13 – 18.  
Yang Haifeng, Wang Xuyou, Wang Wei, *et al.* Process stability analysis of double beam laser welding of aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(6): 13 – 18.
- [5] 滕 彬, 李小宇, 雷 振, 等. 低合金高强钢激光-电弧复合热源焊接冷裂纹敏感性分析 [J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 61 – 64.  
Teng Bin, Li Xiaoyu, Lei Zhen, *et al.* Sensitivity analysis of cold crack in laser-arc hybrid heat source welding of low alloy high strength steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(11): 61 – 64.
- [6] 王旭友, 滕 彬, 雷 振, 等. JFE980S 高强钢激光-电弧复合热源热模拟试验分析 [J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 25 – 28.  
Wang Xuyou, Teng Bin, Lei Zhen, *et al.* Thermal simulation test and analysis of JFE980S high strength steel with laser-arc hybrid heat source [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(11): 25 – 28.
- [7] 林尚扬, 关 桥. 我国制造业焊接生产现状与发展战略研究 [R]. 中国工程院咨询项目总结报告, 2003.
- [8] Bratt C, Noel J. Laser hybrid welding of advanced high strength steels for potential automotive applications [J]. ICALEO 2004 [C]// Orlando: Laser Institute of America, 2004: 201–210.

第一作者简介: 徐 良, 男, 1984 年出生, 硕士, 高级工程师。主要从事激光-电弧复合热源焊接技术研究。发表论文 20 余篇。Email: xuliang9811@163.com